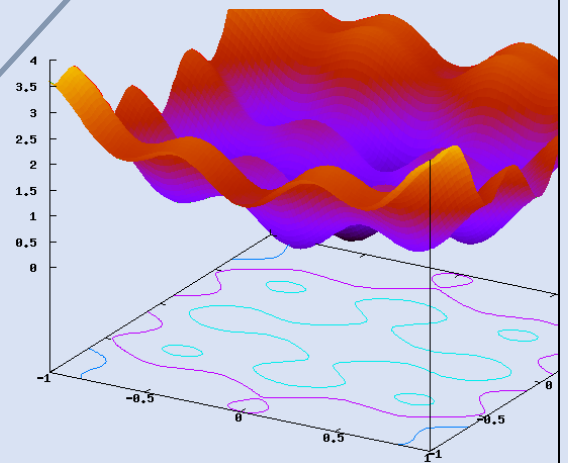


Réduction de débit de fuite d'un réseau de distribution d'eau potable.



Réalisé par :

HAFIDI Faissal

Encadré par :

Mme EL MKHALET Mouna

SOMMAIRE

I.	Introduction.....	2
II.	La modulation de pression.....	3
III.	Méthodes d'optimisation.....	4
IV.	Algorithme génétique.....	6
V.	Méthodologie pour la réduction des fuites d'eau.....	9
VI.	Exemple d'application sur le terrain.....	12
VII.	Conclusion.....	15

I. Introduction

L'eau douce représente un pourcentage très faible dans notre planète (2,5% de l'eau présenté sur la terre), et seul 1% de l'eau douce peut fournir de l'eau potable, donc c'est une ressource limitée qui nécessite une bonne gestion durable.

Le réseau d'eau potable a pour fonction de base de livrer aux utilisateurs de façon continue (24h/24h) une eau de bonne qualité en quantité suffisante et à une pression adéquate. Mais les réseaux de distributions subissent des dégradations au cours du temps liées aux fortes variations de pression (plus élevée pendant la nuit). Ce qui présente une contrainte majeure à distribution continue de l'eau potable. En effet, ces changements permanents de conditions hydrauliques engendrent un grand nombre de fuites qui génèrent des pertes d'eau très importantes et qui peuvent arriver jusqu'à 40%, et donc une partie seulement de l'eau potable produite est réellement distribuée aux usagers. Ces fuites représentent un pourcentage important des eaux non facturées pour un système de distribution d'eau.

Par conséquent, l'identification de la quantité d'eau perdue dans les réseaux d'eau et la localisation des fuites est d'une importance majeure pour les services publics d'eau, aussi bien pour des motifs d'exploitation et de planification. Alors des efforts doivent être consentis pour assurer un bon fonctionnement du réseau de distribution d'eau potable et minimiser les fuites qui causent des pertes d'eau.

Dans cette recherche on proposera une méthodologie de réduction des fuites d'eau basée sur l'optimisation de la courbe de modulation de pression d'un réseau donné par l'utilisation d'un modèle hydraulique et l'algorithmes génétiques. Cela est assuré par le couplage du logiciel de modélisation hydraulique EPANET et MATLAB.

Le choix de ce sujet est dû à sa nature car il représente une problématique en hydraulique dans le domaine de génie civil, aussi il me permet de découvrir une méthode d'optimisation basée sur l'algorithme génétique, et comment l'appliquer dans des problèmes réels. En fin cette méthode me semble très efficace car grâce à elle, les réseaux de distribution d'eau de demain seront plus efficaces ce qui permet d'améliorer l'aspect des villes intelligentes (Smart cities).

II. La modulation de pression

Définition :

La modulation de pression permet réduire au maximum les pressions d'entrée d'un système de réseau de distribution, sans dépasser la valeur minimale nécessaire et suffisante à la satisfaction des besoins des consommateurs.

En pratique, il s'agit de mettre en place des vannes de réduction de pression asservie dont la consigne de pression varie selon une commande. Les systèmes d'asservissements peuvent être une horloge, une mesure de débit sur la canalisation qui porte le dispositif, ou une mesure de pression en un point critique (zone de forte consommation et de basse pression durant la journée).



Mise en place d'un modulateur de pression

Remarque :

Il ne faut pas confondre la modulation de pression avec la réduction de pression, qui permet seulement d'assurer une pression presque toujours supérieure à celle réellement nécessaire à travers un réducteur de pression, pour Satisfaire les demandes de pointes.

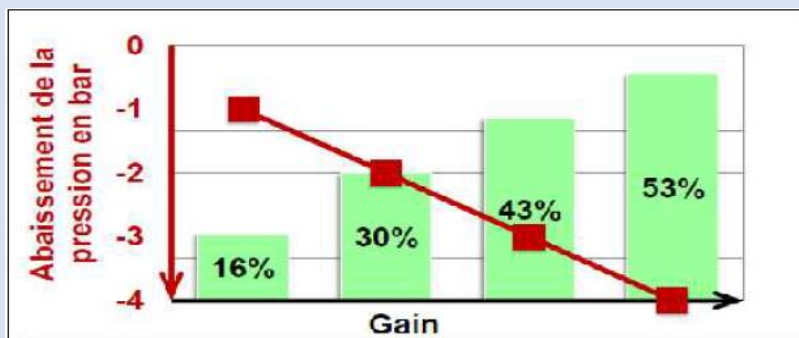


Diagramme de réduire le volume des fuites/la pression **Bayard, 2011**

→ Il suffit d'abaisser la pression initiale de 2 bars pour réduire le volume des fuites à 30%

Investissement dans la modulation de pression :

Le retour sur investissement de la modulation de pression selon la demande est généralement rapide, de l'ordre de 1 à 3 ans si l'on prend en compte les économies d'eau réalisées et la réduction des coûts de détection et réparation de fuites.

D'après le retour d'expérience en France :

La diminution de pression d'environ 20% en moyen provoque :

- Une baisse des volumes mis en distribution de 15% environ
- Une réduction de plus de 25% des débits de nuits.

III. Méthodes d'optimisation

1. Formulation standard de problèmes d'optimisation

Chaque problème d'optimisation structurelle peut être formulé dans la forme standard suivante :

Minimiser $F_m(x_i) ; x_i \in S ; i = 1, \dots, n ; m = 1, \dots, M$

Tel que : $g_j(x) \geq 0 ; j = \{1, \dots, n^g\}$

$h_k(x_i) = 0 ; k = \{1, \dots, n^h\}$

Avec :

F : La fonction objective.

x_i : Le vecteur représentant les variables de décision.

m : Le nombre d'objectifs ($m \geq 1$).

S : L'ensemble des solutions réalisables.

g : Représente les contraintes d'inégalité.

h : Représentent les contraintes d'égalité.

2. Classification des méthodes d'optimisation

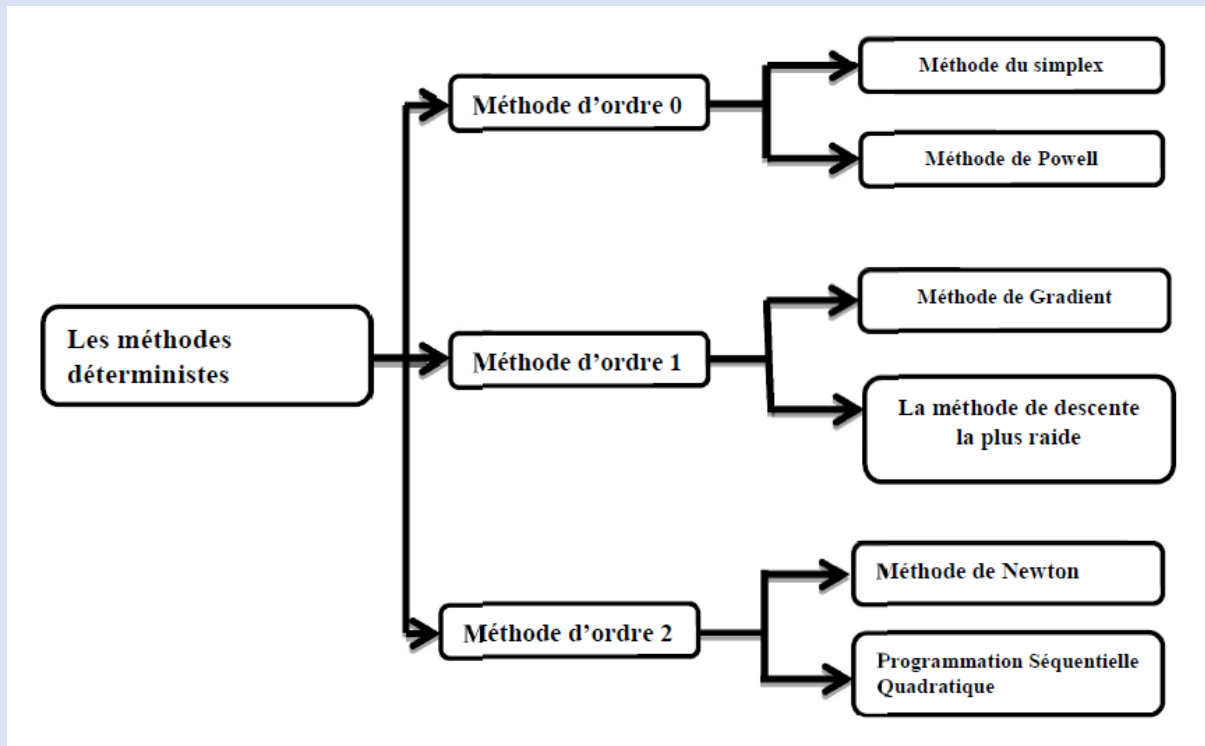
Les méthodes d'optimisation peuvent être divisées en méthodes classiques (déterministes) et méthodes métaheuristiques.

Les méthodes classiques (déterministes) : sont des méthodes qui n'utilisent aucun concept aléatoire, et se déterminent par une exploration systématique de l'espace

de recherche. Elles nécessitent des hypothèses sur la fonction objectif, telles que la continuité et dérivabilité en tout point du domaine de recherche.

Les méthodes classiques se divisent en deux groupes :

- Les méthodes d'exploration directes : recherchent les optimaux locaux en se déplaçant dans une direction qui dépend du gradient de la fonction.
- Les méthodes d'exploration indirecte : cherchent à atteindre les extremums locaux en résolvant des systèmes d'équations, souvent non linéaires, obtenus par l'annulation du vecteur gradient de la fonction.



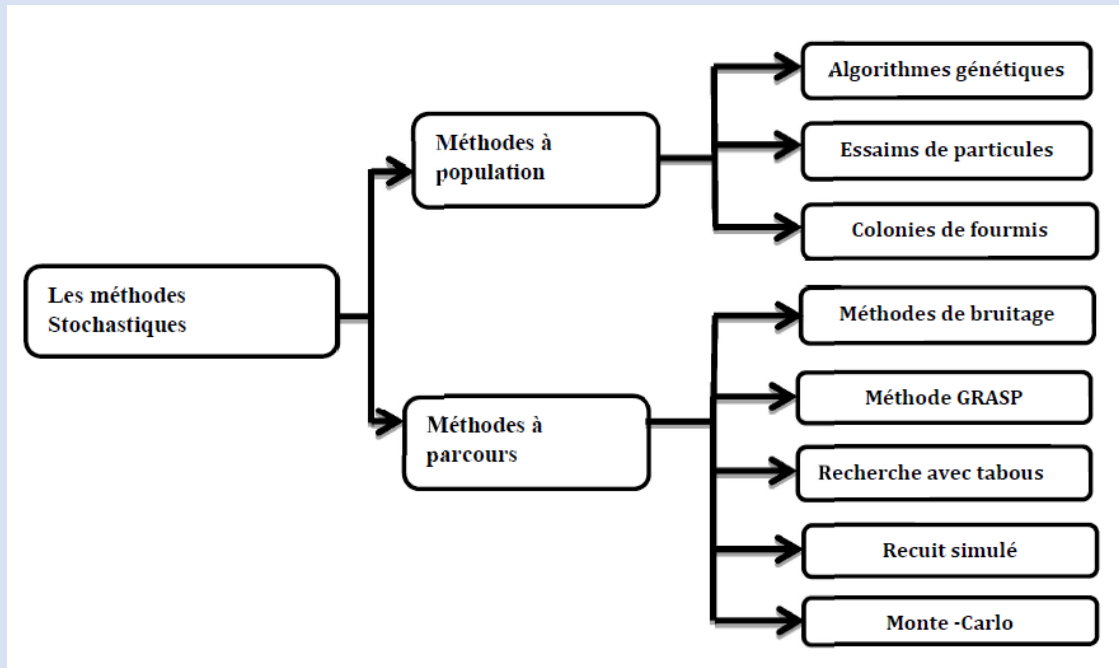
Les méthodes métaheuristiques : sont basées sur un mode de fonctionnement et balayage global dans l'espace de variables de conception qui diffèrent des méthodes déterministes basées sur les principes de dérivations à gradients. Ils travaillent globalement en utilisant les valeurs qui résultent de la fonction ou même d'un phénomène mesuré expérimentalement sans nécessairement connaître la nature mathématique de cette fonction.

Les méthodes stochastiques peuvent bien être utilisées avec des variables discrets et de trouver l'optimum global avec efficacité dans le cas de l'existence de plusieurs valeurs optimales locales. Cependant un nombre d'évaluation élevé de la fonction objective peut être exigé afin de trouver la combinaison des paramètres optimaux.

Ils peuvent être classées globalement en deux catégories :

- Les méthodes stochastiques à population : le méta heuristique manipule à chaque itération un ensemble de solutions en parallèle. Comme exemple les algorithmes génétiques, et les algorithmes de colonies de fourmis.
- Les méthodes stochastiques à parcours : dont l'algorithme travaille avec une seule solution sur l'espace de recherche, les plus connues dans cette catégorie sont, la

recherche avec tabous, la recherche au voisinage, la méthode GRASP ou encore les méthodes de bruitage.



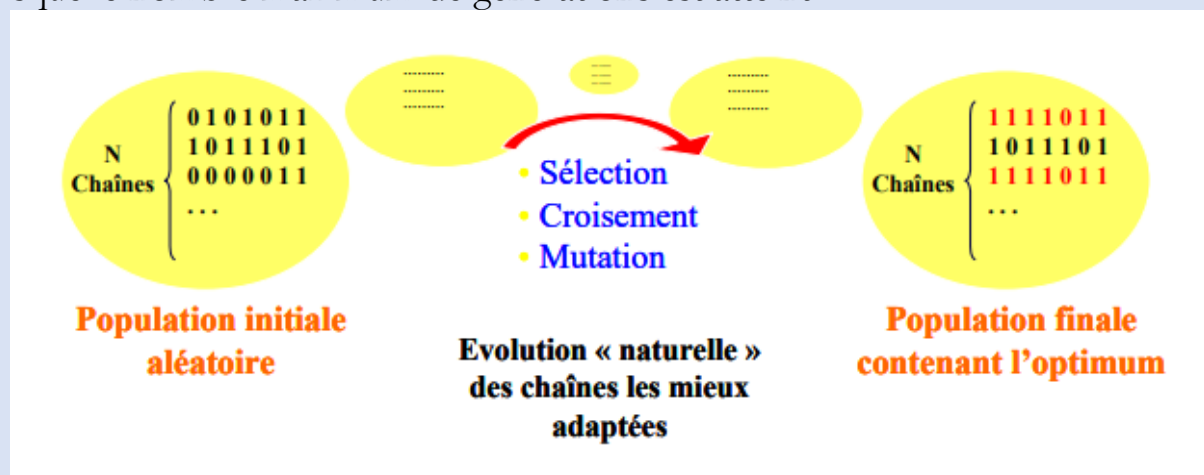
Remarque : Dans la suite de notre recherche on s'intéressera à l'optimisation par l'algorithme génétique.

IV. Algorithme génétique

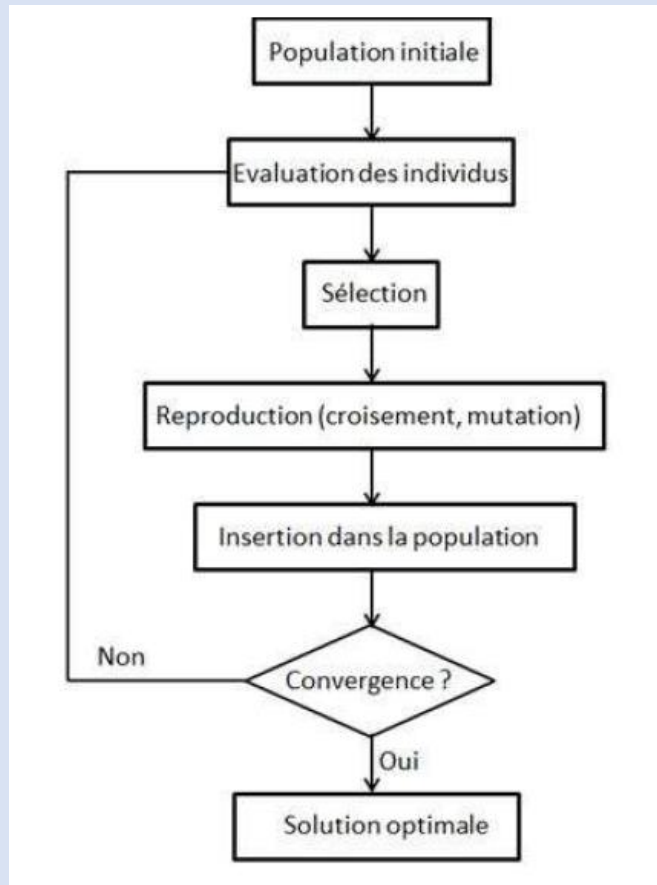
1. Principe

Les algorithmes génétiques font évoluer une série de N individus d'une population que l'on appelle une population de N chromosomes ou chaînes, choisie initialement au hasard, par le biais des opérateurs génétiques : sélection, croisement et mutation.

L'algorithme fait évoluer de façon naturelle la population de départ, avec comme principe directeur que les chromosomes les mieux adaptés, pour lesquels la valeur de la fonction objective est la plus grande, ont plus de chance de survivre et de conduire à la solution optimale. Ce processus itératif est arrêté en cas de stagnation de l'évolution ou lorsque le nombre maximum de générations est atteint.



Le processus de l'algorithme génétique :



→ Etapes de la procédure d'optimisation de l'algorithme génétique :

Le codage : transformer toutes les variables à une combinaison de codes, où la plus utilisée est sous la forme binaires (chromosome). Ces chromosomes seront couplés afin de reproduire une nouvelle génération de solution possible.

La sélection : Cette manipulation est la première dans l'évolution d'une population. Elle traduit le principe que seuls les chromosomes les mieux adaptés survivent. L'évolution d'une population se fait en choisissant parmi l'ancienne population autant de chromosomes que nécessaire pour créer une nouvelle population de même taille. Le principe de la sélection est basé sur un concept probabiliste ou dans chaque groupe d'éléments, la distribution probabiliste de sélection sera d'une façon pour laquelle les éléments à meilleur aptitude mesure par la fonction objective prennent la probabilité maximale d'être sélectionnés.

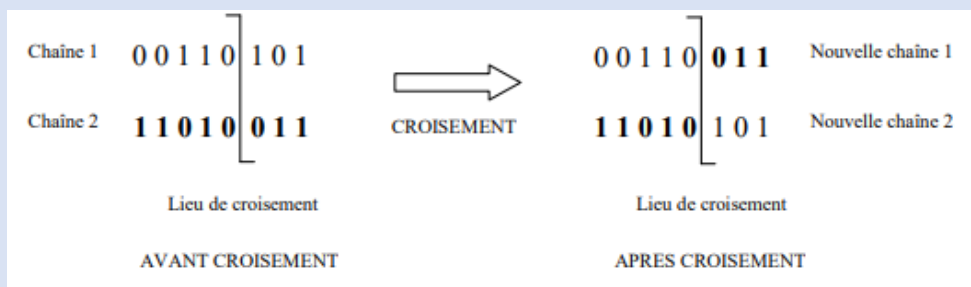
Il existe plusieurs méthodes de sélection, la plus utilisée est la roue de fortune. Le principe de cette méthode consiste à donner le meilleur emplacement d'un individu dans la roue de fortune selon sa valeur par la fonction objectif (valeur de fitness) dans une population de taille maximale J_{max} . Un individu de valeur de fitness égale à $F(j)$, la probabilité de sélection de cet individu (j) est calculée par la formule :

$$Prob(j) = \frac{F(j)}{\sum_{j=1}^{Jmax} F(j)}$$

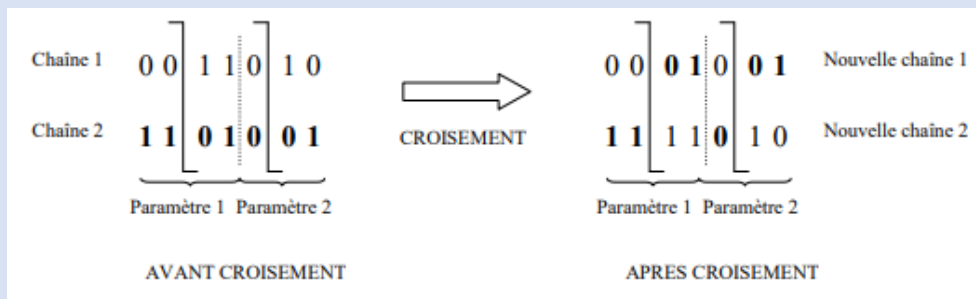
Croisement : Cette opération consiste, pour une paire de chromosomes sélectionnés, à croiser une partie des deux chaînes codées pour créer deux nouvelles chaînes de la nouvelle population. C'est ici que le codage des chaînes devient indispensable. Cette opération se fait en sélectionnant aléatoirement une position de croisement sur les chaînes codées et en échangeant les parties de code ainsi définies dans le but de créer un nouveau chromosome meilleur et performants.

Trois façons ont été envisagées pour croiser des chaînes :

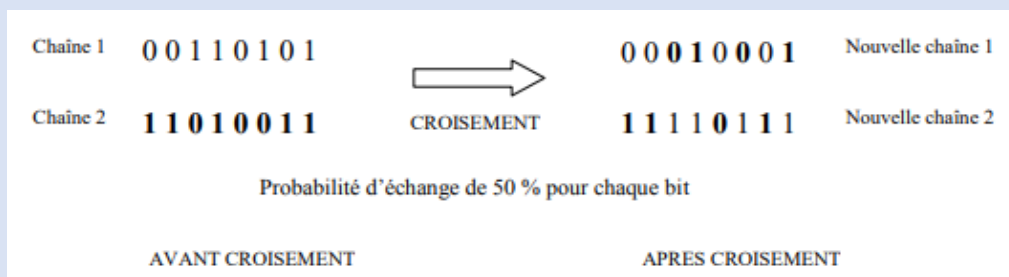
- Soit on sélectionne une position dans la chaîne globale et on croise alors deux demi-chaînes (croisement simple ou en 1 point).



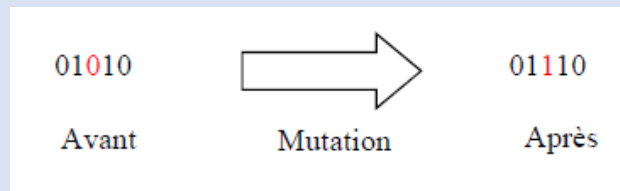
- Soit on sélectionne une position de croisement pour chaque sous chaîne représentant un paramètre et on croise entre elles les chaînes de codes pour chaque paramètre séparément (croisement en 1 point par paramètre).



- Le croisement uniforme : consiste à croiser tous les bits de 2 chaînes avec une probabilité de 0,5.



La mutation : de point de vue numérique assure une diversité dans la population qui pousse l'algorithme génétique à faire plus de recherche pour un optimum global au lieu de stagner dans une valeur locale.



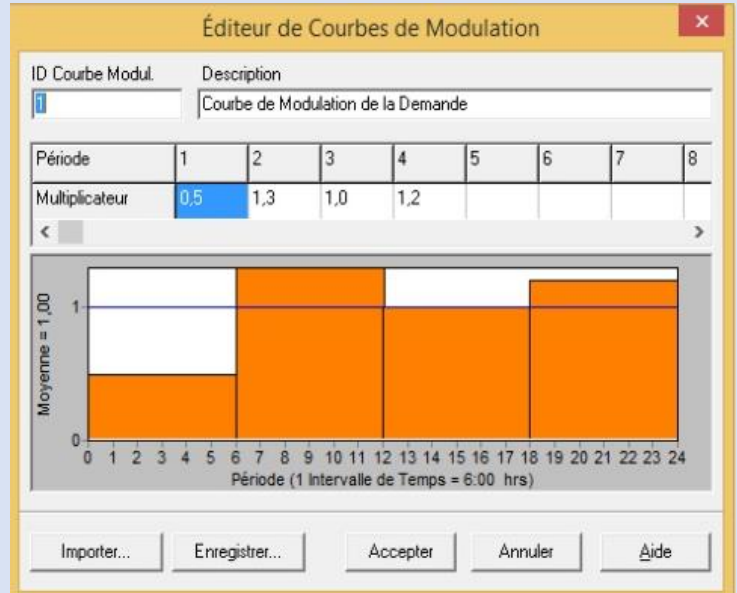
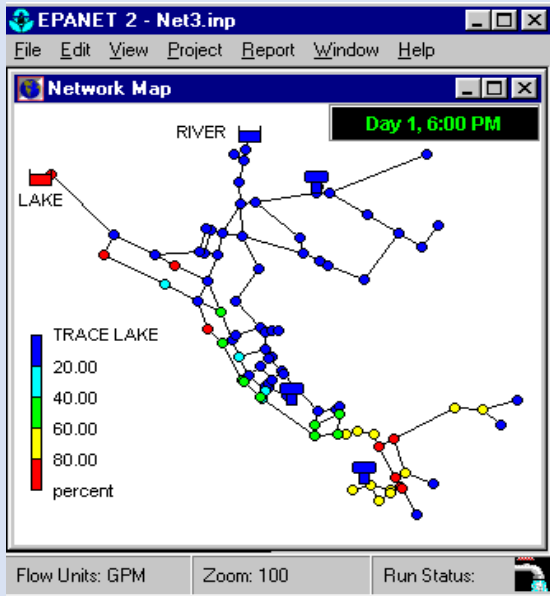
L'algorithme génétique peut être déclaré comme suit :

Début
Initialisation de la population P
Evaluation de chaque chaîne de bits dans la population
Répète
 Répète
 Sélection de 2 individus ou plus dans P
 Application de l'opérateur de croisement avec une probabilité
 Application de l'opérateur de mutation avec un ratio correspondant.
 Insertion des nouveaux individus P'
 Jusqu' à ce que la population P' est complète.
 Evaluation du fitness des individus de la nouvelle population P'
P reçoit P'
Critère d'arrêt (nombre maximal d'itération)
Stop
End

V. Méthodologie pour la réduction des fuites d'eau

Pour répondre à notre objectif de réduction des fuites dans les réseaux de distribution d'eau potable, on a développé une méthode dans cette recherche qui se repose sur le couplage entre un logiciel de calcul mathématique Matlab avec un logiciel de simulation hydraulique EPANET.

EPANET est un logiciel de simulation du comportement hydraulique de l'eau. Il calcule le débit dans chaque tuyau, la pression à chaque nœud, le niveau de l'eau dans les réservoirs et la concentration en substances chimiques dans les différentes parties du réseau. Il peut être utilisé également pour différents types d'application dans l'analyse des systèmes de distribution. Dans notre cas on va l'utiliser pour obtenir la courbe de modulation de pression du réseau étudié.



Notre méthode consiste à l'optimisation des consignes de modulation en utilisant l'algorithme génétique. En effet après la modélisation du réseau dans EPANET, ce dernier donne la courbe de modulation qui doit être optimiser avec l'algorithme génétique par MATLAB, pour obtenir en fin les consignes de modulation engendrant une pression optimale qui correspond au débit minimum des fuites d'eau.

Fonction objective :

On se trouve dans un problème d'optimisation non linéaire, qui minimise le débit de fuite dans le réseau de distribution d'eau potable. La fonction objective ciblée par ce programme est le débit de fuite :

$$F(x) = \min_{C_1, C_2, \dots, C_n} (Q_{fT})$$

$$Q_{fT} = f(P_{cal,t}(C_1, C_2, \dots, C_n))$$

$P_{cal,t}$: la pression calculée.

C_n : la consigne de modulation.

Q_{fT} : le débit de fuite totale.

x : variable qui contient les consignes de modulation.

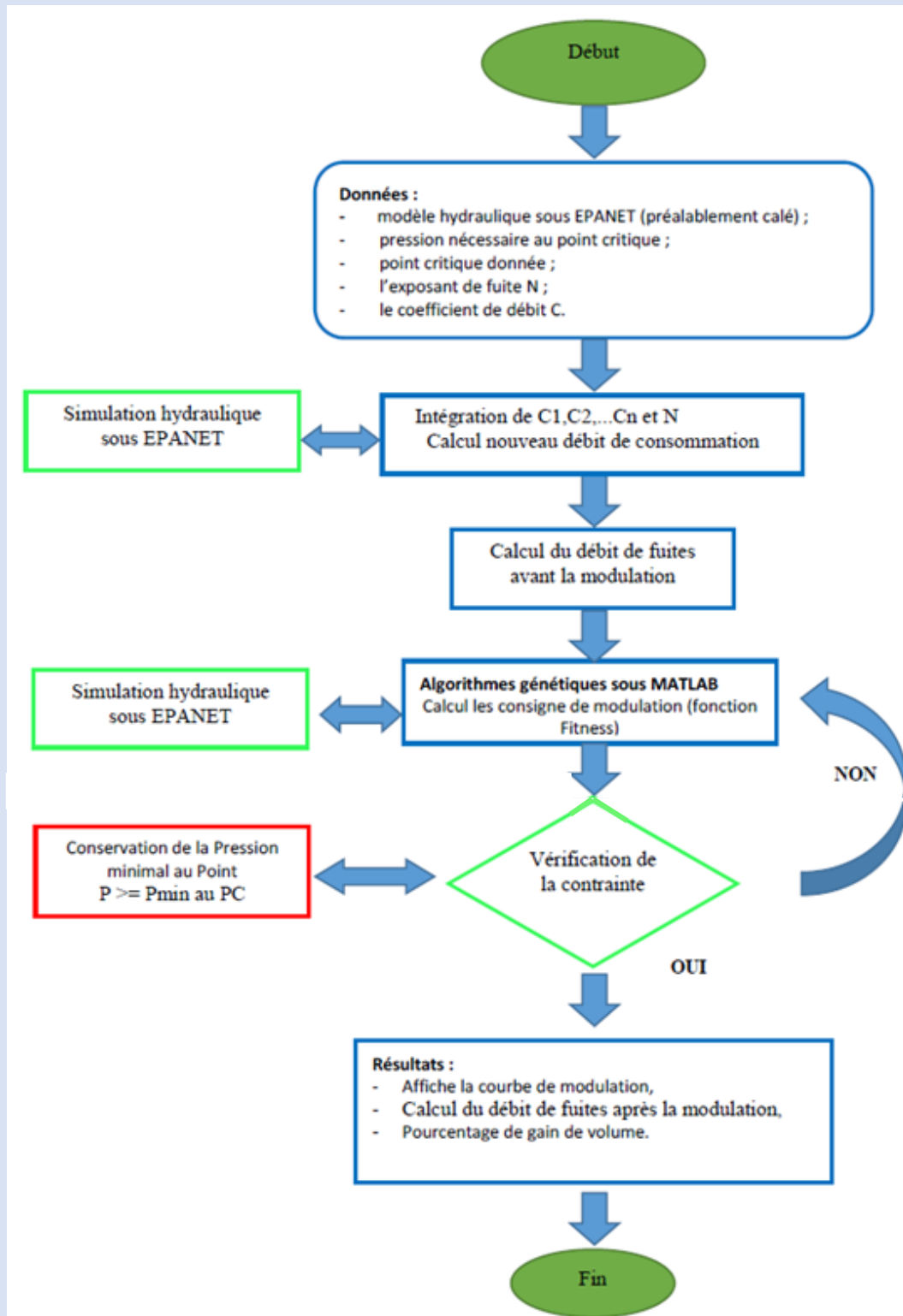
$$x = (C_1, C_2, \dots, C_n)$$

Contraintes :

La pression calculer au point critique (pc) doit être supérieure ou égale à la pression minimale nécessaire au même point pour chaque intervalle de temps :

$$(P_{cal,t} \geq P_{min,t})_{pc}$$

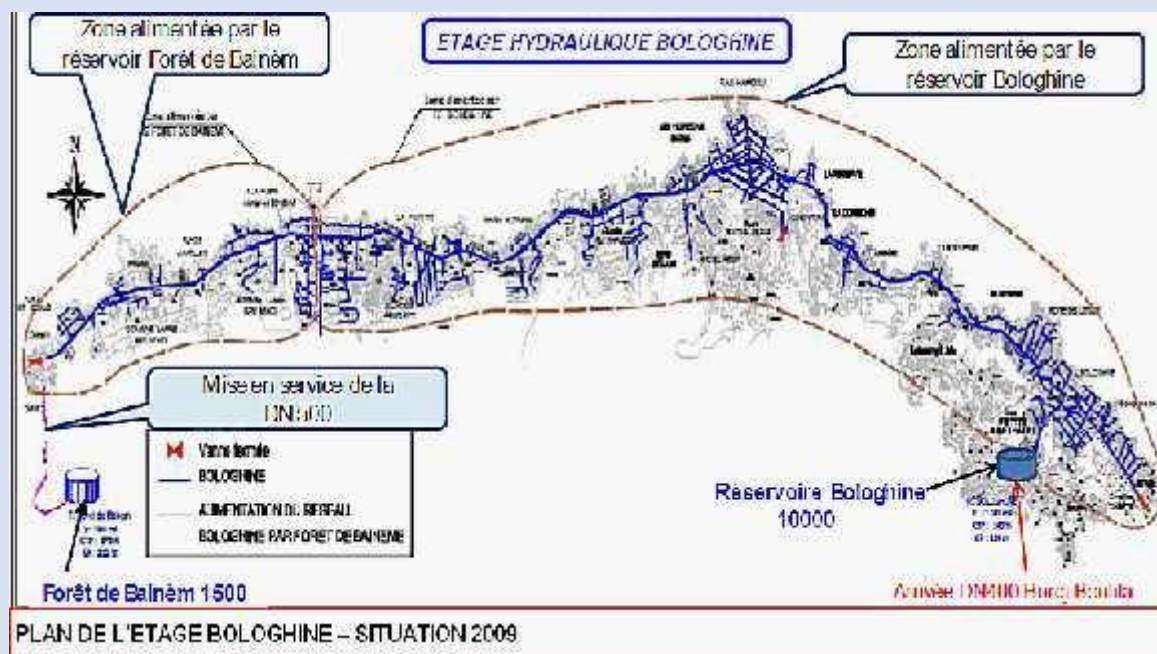
Organigramme de fonctionnement :



VI. Exemple d'application sur le terrain :

La méthode proposée est déjà appliquée dans la ville de Bologhine à l'Algérie. Pour connaître le rendement de cette méthode, nous s'intéressons aux résultats obtenus.

Description des installations hydrauliques de Bologhine :



Demande en eau :

Année	2009	2011	2015
Population	61867	62668	63525
Demande en eau domestique m3/j	9 159	9436	9 138
Demande en eau diffuse m3/j	2 748	2840	2 742
Demande en eau des grands consommateurs m3/j	638	630	604
Rendement de réseau %	63	66	66,5
Demande en eau totale m3/j	12545	12906	12484

Calage de modèle hydraulique :

Après l'identification du modèle hydraulique étudié, un calage de ce modèle est nécessaire. En effet le modèle de réseau sera considéré comme calé lorsque les courbes obtenues par simulation présenteront le même profil que les courbes de mesure. Cela nous montre que le calage permet de rendre les résultats de la simulation par EPANET et les résultats mesurés plus proche et tend à annuler les erreurs existantes.

Modulation de pression du réseau de Bologhine :

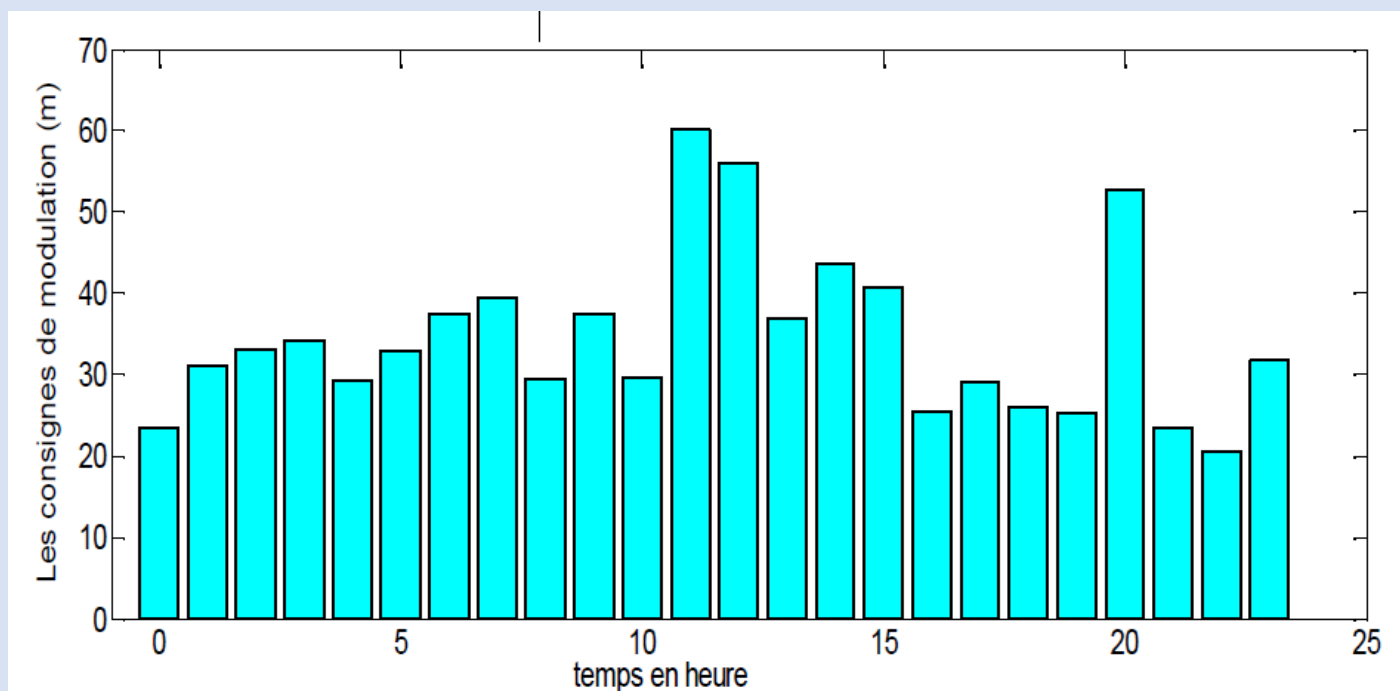
Pour pouvoir donner des consignes à notre réseau, on installe des vannes de modulation de pression. Pour que ces vannes stabilisatrices fonctionnent correctement et sans perturbation, il est nécessaire que toutes alimentations du réseau passent par ces vannes, donc il faut maîtriser toutes les entrées du réseau. Pour cela, des modifications (maillages, raccordement, installation de vannes, fermeture de quelques vannes, ...) sont établies. Et avant tous il faut identifier le point critique de réseau.

D'après des calculs effectués sur notre réseau on trouve que la pression nécessaire du point critique (P_{PC}) varie en fonction du profil horaire :

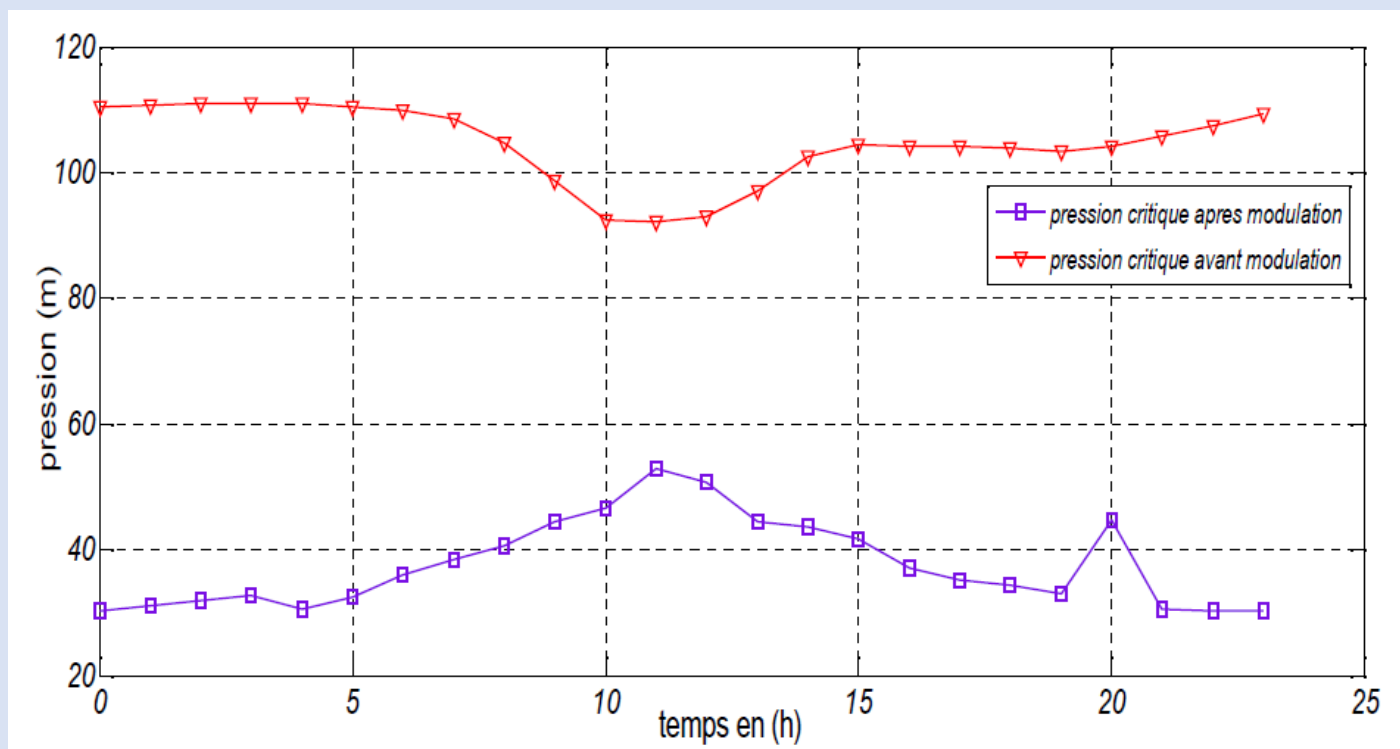
- Pendant les heures de pointe : $P_{PC} = 44m$
- Pendant les heures creuses et la nuit dont on néglige toutes les pertes de charges : $P_{PC} = 30m$

NB : Dans le cas de notre modulation, la vanne en modulation est programmée à s'ouvrir ou à se fermer selon un profil horaire.

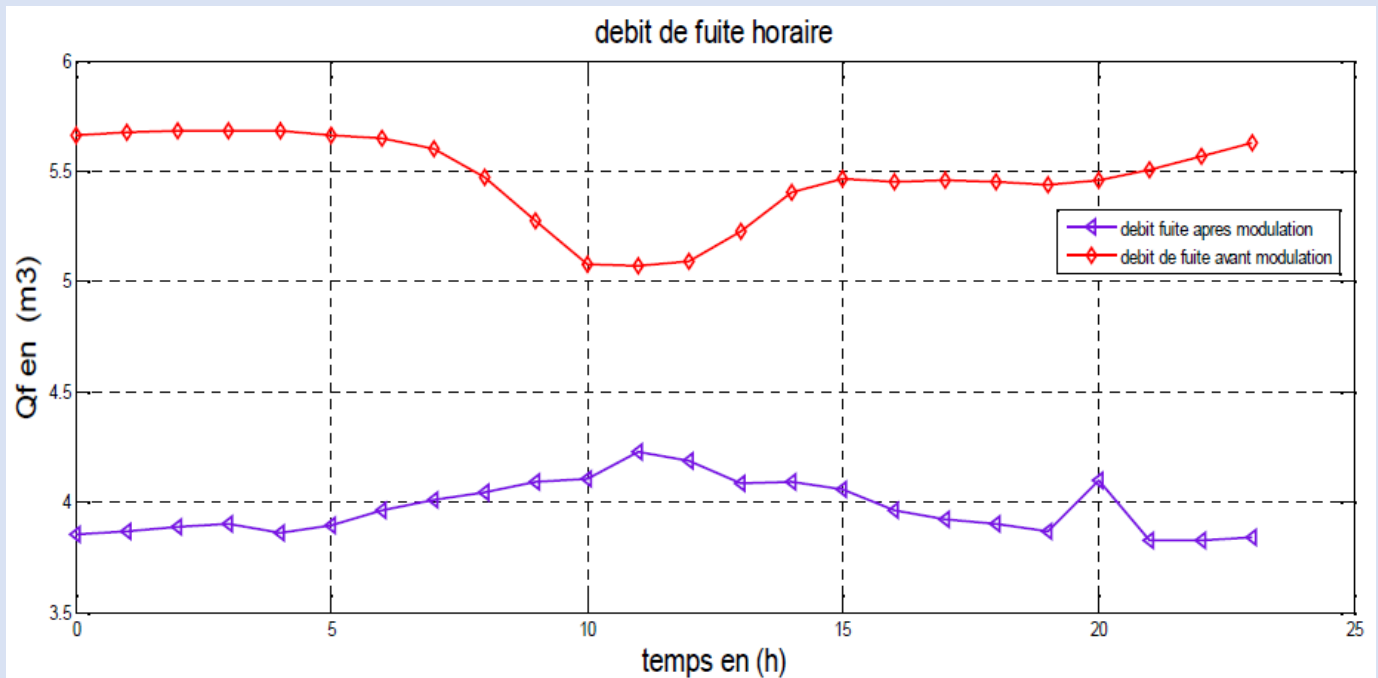
Résultat de la méthode :



Variations des consignes de modulation de pressions obtenues par l'algorithme génétique



Courbe de variation de la pression au point critique avant et après la modulation de pression



Variation de débit de fuite horaire avant et après la modulation de pression

	Avant Modulation		Après Modulation		Différence	
	Heures creuses 00 :00	Heure de pointe 11 :00	Heures creuses 00 :00	Heure de pointe 11 :00	Heures creuses 00 :00	Heure de pointe 11 :00
Pression au point critique (bars)	10.92	9.24	3.01	4.65	7.91 - 72.43%	4.59 - 49.67%
Volume journalier mis en distribution (m³/j)	10805.500		10769.4664		36.0336	
Volume de pertes par fuites (m3/j)	131.3504		95.3168		36.0336 - 27.43%	

Comparaison des débits de fuite de réseau de BOULOGHINE avant et après modulation de pression.

VII. Conclusion

À travers les résultats obtenus, on remarque que notre méthode, basée sur l'optimisation (par algorithme génétique→MATLAB) des consignes de modulation obtenus par une modélisations de notre réseau dans EPANET, a pu engendrer une baisse de pression très importante, et donc réduire les fuites des eaux perdues ce qui a augmenté le rendement du réseau.

Nous pouvons alors affirmer l'efficacité des algorithmes génétiques dans l'optimisation du fonctionnement du réseau.

Ces résultats sont fortement reliés à :

- La fiabilité des données d'exploitation.
- Le bon placement des points de calage.
- La précision des instruments de mesure ainsi que la mise à jour du modèle hydraulique.

Pour un élargissement de ce sujet, la méthode proposée est besoin d'être encore mieux développer et ceci par l'amélioration des résultats du calage par une meilleure localisation des points de mesures pour avoir des données plus fiables et donc élaborer une modélisation hydraulique qui s'approche plus de la réalité.

La valeur ajoutée : cette méthode permet une bonne gestion de la pression hydraulique du réseau et donc :

- minimiser les pertes d'eau.
- minimiser la demande en eau, ce qui va réduire le coût de traitement d'eau potable.
- minimiser la dégradation des réseaux de distribution à cause des pressions très élevé.
- minimiser la fatigue mécanique des canalisations, et donc l'augmentation de leur durée de vie.

Cette méthode est applicable au Maroc puisqu'il dispose des moyens techniques et financiers nécessaires. En effet cette méthode demande des investissements moyen au départ, mais le retour sur investissement dans cette méthode est généralement rapide, de l'ordre de 1 à 3 ans. C'est-à-dire que les charges d'installation des éléments nécessaires seront récupérables après 3 ans au plus. Après, la méthode sera rentable puisqu'il ne demandera que des charges de maintenance et de contrôle.

A mon avis, ce projet ou les projets d'optimisations en générale vont avoir plus d'efficacité s'ils seront effectués par un bureau d'étude au lieu d'une grande société, car dans la plus par des cas on trouve que ces problèmes d'optimisation nécessitent l'utilisation des algorithmes très complexe, des calculs mathématiques plus profond

et l'utilisation des logiciels..., et cela correspond aux travaux des bureaux d'études qui recrutent des ingénieurs capables de faire ces missions. Par contre, les grandes sociétés recrutent des ingénieurs qui sont plus destinés vers des missions de contrôle et gestion de projet.

Références :

- <https://bit.ly/3tYowEa>
- <https://archive.org>
- <https://fr.wikipedia.org/>
- <http://thesis.univ-biskra.dz/id/eprint/2878> (optimisation et algorithme génétique)
- <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-23540-guide-onema-fuites-eau.pdf>
- <https://fr.slideshare.net/rolandyonaba/introduction-au-moodle-epanet>